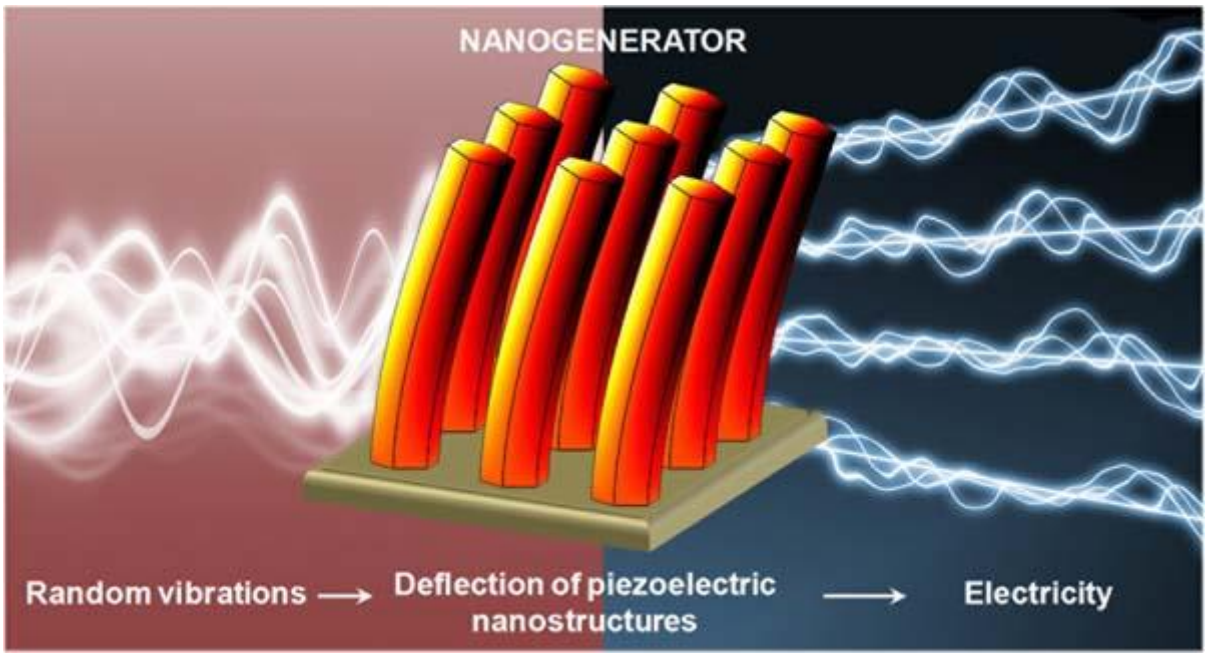
RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE PAR VOIE PIÉZOÉLECTRIQUE



(http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2211285511000085-fx1.jpg)

Aurélie NÈGRE

aurelie.negre@yahoo.fr

Master ILTS 2012-2013

(option IL)

Protocole de recherche documentaire

Sous la direction de
Mme Geneviève BORDET

Université Paris 7 Denis Diderot

« La phrase la plus excitante à entendre en science, celle qui annonce de nouvelles découvertes, n'est pas « *Eureka* » (J'ai trouvé !), mais plutôt « Tiens, c'est marrant… »

Isaac Asimov

SOMMAIRE

SOMMAIRE 3
INTRODUCTION GÉNÉRALE 4
Choix du domaine 4
Choix du texte 4
Présentation du texte de mémoire 5
À la recherche d'un micro-domaine 7
Présentation du domaine 9
LA DÉMARCHE DE RECHERCHE 11
Des débuts difficiles 11
Étapes de la réflexion 12
Une progression par à-coups : les éléments déclencheurs 13
Techniques et outils de recherche utilisés 15
La constitution du corpus 19
L'expert 21
Les manques à pallier 22
LES CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DU DOMAINE 23
Présentation de la production documentaire du domaine 23
Position, problem, solution 25
BILAN 27
ANNEXES 28

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Choix du domaine

L'année passée, en Master 1 ILTS, je m'étais posé la question de la spécialisation en traduction. Un traducteur doit-il se spécialiser ? Et si oui, dans quel domaine ? Après de longues tergiversations, j'avais décidé que je choisirais trois domaines de spécialisation très différents afin d'obtenir du crédit auprès des esprits rigides et que je traduirais les textes les plus divers et variés pour les autres. J'avais donc opté pour les trois domaines suivants : les cellules souches, l'automobile et une énergie renouvelable (sans bien savoir laquelle).

Après avoir réussi le concours d'entrée en ILTS, ma priorité a été de trouver une entreprise. Je souhaitais faire mon alternance dans une grande entreprise plutôt que dans une agence de traduction et savais que ma prospection n'en serait pas facilitée. D'avril à juin, j'envoyai donc des dizaines de C.V. un peu partout, sans succès. Le Job Dating du 24 juin revêtait donc pour moi une importance particulière, car je m'étais déjà heurtée aux difficultés de la recherche d'alternance. Une des entreprises de la liste m'intéressait tout particulièrement : la SNECMA. Et mon choix de spécialisation « automobile » de se transformer en « aéronautique ».

Le jour du Job Dating, j'étais prête. Ma petite fiche « SNECMA » dissimulée dans mon sac (quelques petites recherches en amont ne sont jamais inutiles), je me dirigeais d'un pas vif vers la table où m'attendait le recruteur. Et de lui vendre mes excellentes capacités relationnelles (faux), ma maîtrise de l'anglais technique (faux), mon aisance à l'oral (faux) et mon souhait de choisir un sujet de mémoire en relation avec l'entreprise… Sauf que faire le choix de la facilité n'a jamais été mon fort. Après avoir reçu la réponse positive de la SNECMA, je me mis donc à rechercher un sujet de mémoire parmi les deux autres domaines de spécialisation que j'avais sélectionnés.

« Vous avez droit à n'importe quel sujet de mémoire… à l'exception du domaine médical. » Adieu cellules souches. Bonjour énergies renouvelables. Et justement, quelques semaines auparavant, j'avais eu une idée qui me semblait révolutionnaire : convertir le son en électricité ! Idée brillante s'il en est, mais loin d'être révolutionnaire… Dans la revue WE DEMAIN, je découvris que deux chercheurs coréens étaient déjà bien avancés sur le sujet, qu'ils utilisaient pour cela la piézoélectricité et plus précisément les cristaux piézoélectriques. Un terme (qui me semblait) compliqué. Un domaine dont je n'avais jamais entendu parler. Il ne m'en fallait pas plus. J'en discutai aussitôt avec M. Froeliger (qui de son côté semblait savoir mieux que moi ce dont il était question).

Voici comment je me plongeai dans le fabuleux domaine de la piézoélectricité.

Choix du texte

1) Un choix trop rapide

J'avais une entreprise. J'avais un domaine. Nous n'étions qu'en juillet, je décidai de prendre de l'avance. Il me manquait un texte. J'essayais donc de préciser ma recherche en me

concentrant sur la piézoélectricité utilisée pour la récupération d'énergie. Je recherchais tout d'abord des textes en allemand, en saisissant les termes « Piezoelektrizität » et « Energy Harvesting » dans le moteur de recherche www.google.de. En vain. Je me résolus donc à chercher un texte en anglais, sur Science Direct. J'aimerais dire qu'utiliser cette ressource fut un choix réfléchi, mais en vérité, mes connaissances en recherche documentaire étaient à cette période très limitées et me laissaient penser que j'avais à choisir entre un article de recherche et une thèse. Préférant trouver un texte dans lequel je n'aurai pas de coupes à effectuer, je voulais un article de 30 000 à 40 000 caractères. Les mots-clés que j'employais alors étaient très simples : « piezoelectricity », « energy » puis « energy harvester ».

Je trouvai alors un texte intitulé : *A Shear Mode Piezoelectric Energy Harvester Based on a Pressurized Water Flow,* écrit par deux auteurs chinois. En 32 000 caractères, les auteurs décrivaient la mise au point d'un prototype de récupérateur d'énergie utilisant la piézoélectricité.

2) Le texte sacro-saint

J'ai donc trouvé un texte très tôt dans l'année. Néanmoins, ce que je pensais être un avantage se révéla vite être un inconvénient. En effet, ce texte était composé de deux parties principales, l'une concernant des calculs et des méthodes de modélisation (la théorie), l'autre concernant la conception du récupérateur (la pratique). Ces deux aspects faisant appel à des domaines très différents (modélisation mathématique et outils informatiques pour l'un, techniques d'assemblage et d'usinage des matériaux pour l'autre), j'eus au sein même de mon texte du « bruit », c'est-à-dire que la multiplicité des domaines abordés m'empêchait d'aller à l'essentiel. Je restai donc longtemps bloquée pour trouver mon microdomaine. Dans l'idéal, je pense que j'aurais dû attendre de cibler un microdomaine avant de choisir mon texte. De plus, les heures de recherche pour trouver un texte et le fait que celui-ci réponde parfaitement aux exigences du texte de mémoire m'ont empêchée d'en changer. Aujourd'hui, je pense que ce choix n'était pas le plus judicieux.

Présentation du texte de mémoire

1) Les auteurs

Mes deux auteurs sont chinois.

Le premier, Dung-An Wang (celui que j'ai joint pour lui demander son autorisation) est professeur associé à l'Institute of Precision Engineering (IPE) de la National Chung Hsing University. Il a effectué des études en Génie mécanique en Chine (Bachelor of Science à la National Sun Yat-Sen University, Master of Science à la National Taiwan University) puis aux États-Unis (Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering à l'University of Michigan).

Le second, Nine-Zeng Liu, est apparemment un ancien étudiant de Master de Dung-An Wang. Je n'ai pas pu trouver d'informations à son sujet. Il semble qu'il n'ait publié qu'un seul article.

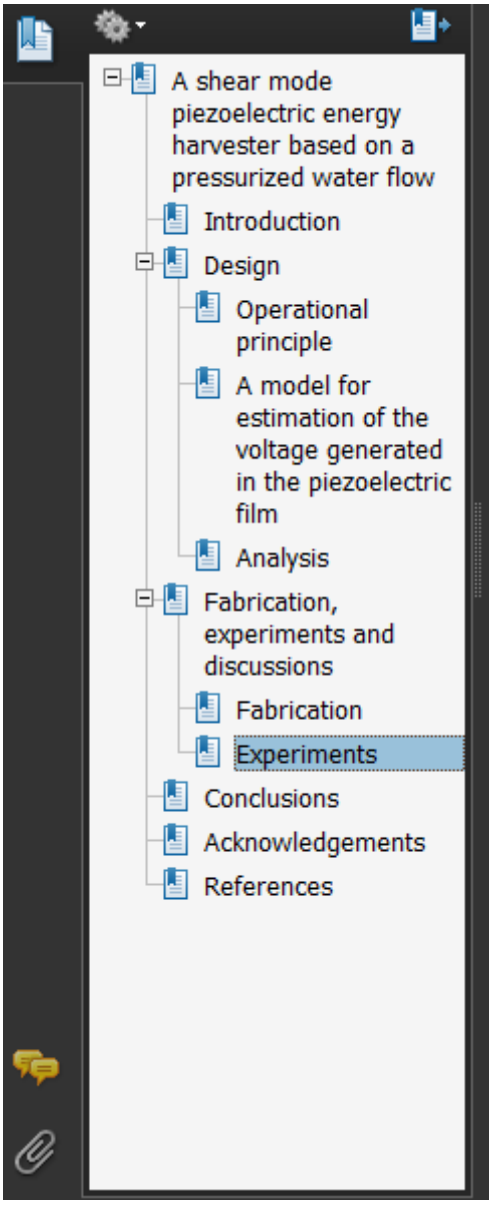
2) La revue

Pour mieux comprendre les enjeux de mon domaine, j'ai effectué quelques recherches sur la revue dans laquelle a été publié mon article : *Sensors and Actuators A: Physical*.

D'après Wikipedia, *« **Sensors and Actuators A: Physical** (abrégé en Sens. Actuator A-Phys.) est une revue scientifique à comité de lecture. Ce mensuel publie des articles de recherches originales concernant les domaines des capteurs, actionneurs et microsystèmes électromécaniques en physique*[1] ». Le facteur d'impact de cette revue, éditée par le groupe ELSEVIER, était de 1 802 en 2011 (Source : *Journal Citation Reports*).

Ces quelques informations nous donnent de précieux renseignements. On aurait en effet pu s'attendre à ce qu'un article sur la récupération d'énergie soit publié dans une revue sur les énergies vertes ou les enjeux énergétiques. Ceci nous indique que les enjeux du domaine ne gravitent pas, comme on pouvait s'y attendre, autour de la récupération d'énergie, mais autour de la structure du récupérateur.

3) La structure de l'article



Mon article se compose d'un abstract, d'une introduction, d'une partie théorique, d'une partie pratique et d'une conclusion.

L'introduction est assez longue et sert en quelque sorte de justificatif à mes auteurs : ceux-ci font un bref résumé de ce qui a été tenté auparavant et énoncent leur théorie.

Cette théorie est ensuite détaillée dans la partie « Design » : les auteurs présentent le principe sur lequel ils se basent, le modèle mathématique qu'ils ont créé et en font une analyse.

La partie suivante, « Fabrication, experiments and discussions », décrit le procédé d'assemblage du prototype de récupérateur d'énergie, les tests menés et les résultats obtenus.

En conclusion, les auteurs résument les résultats qu'ils ont obtenus et proposent des pistes de réflexion pour améliorer leur travail.

Cette structure est donc un peu différente de la structure classique IMRED (Introduction, Méthode, Résultats Et Discussion) puisque les deux parties principales contiennent chacune une partie méthode et une partie résultats. Cette différence peut s'expliquer par l'opposition théorie / pratique qui règne dans mon article et plus généralement dans mon domaine.

À la recherche d'un microdomaine

Trouver mon microdomaine a été une quête éprouvante.

Comme je l'ai indiqué plus haut, ma recherche documentaire a débuté quelques semaines avant le début des cours. J'avais joint Mme Bordet par email et celle-ci m'avait conseillé de lire de la vulgarisation sur mon domaine. Je saisissais donc dans le moteur de recherche Google « piézoélectricité ». Les résultats étaient nombreux et me renvoyaient sur des articles traitant de nouvelles technologies : des chaussures piézoélectriques, une boîte de nuit qui récupérait l'énergie des pas des danseurs grâce à des capteurs piézoélectriques, un rond-point qui n'était alimenté que par la pression des pneus des voitures sur la chaussée et la pression des pas des passants sur les trottoirs, etc. Je lisais également des articles expliquant le principe

de la piézoélectricité : une pression appliquée sur un matériau piézoélectrique permettait de produire de l'électricité. Le principe et ses applications me paraissaient assez simples.

Après le début des premiers cours de documentation, mes recherches se firent plus précises, les outils que j'utilisais plus variés. Je recherchais des textes anglais sur Google Scholar, diversifiais les sources de mes articles scientifiques (Science Direct, IOP Science…), alimentais mon corpus. Pour les textes français, je recherchais surtout des thèses sur HAL et essayais de combiner des mots-clés afin de préciser mon domaine (Scirus). Je recherchais également des sites de vente afin de me faire une idée des applications industrielles de la piézoélectricité, trouvai le Piezoinstitute (institut européen de la piézoélectricité), etc.

Néanmoins, j'avais l'impression de ne pas avancer. Je ne parvenais pas à comprendre mon domaine, encore moins à en dégager un microdomaine. Mon texte ne m'aidait guère : j'avais choisi un article de recherche expérimentale qui décrivait l'étude préliminaire et la mise au point d'un récupérateur piézoélectrique. L'auteur ne s'attardait ni sur les enjeux du domaine, ni sur les concepts utilisés. Je parvenais tout de même à comprendre que mon domaine se trouvait à la limite de trois domaines de la physique : la mécanique, l'électricité et l'acoustique. La plupart des articles que je trouvais étaient publiés dans des revues relatives à la Science des matériaux. Ce qui me paraissait étrange, puisque je pensais travailler sur les énergies renouvelables.

Par la suite, je trouvais de la documentation sur les instruments de mesure, notamment spatiaux. Cette application de la piézoélectricité fut la première que je parvins à isoler et à exclure de mon microdomaine : elle exploitait en effet l'effet inverse de la piézoélectricité, c'est-à-dire la capacité pour un matériau de se déformer/déplacer sous l'effet d'un champ électrique. J'exclus par la suite tout ce qui concernait les sonars et plus généralement les détecteurs. Mais il me restait une documentation très importante et un microdomaine à définir.

En adoptant l'approche « Position, Problem, Solution » que nous avions vue en cours de recherche documentaire, je pus définir l'une des problématiques de mon domaine : « Comment optimiser le rendement de la conversion piézoélectrique ? » Je me suis par la suite concentrée sur cette question et me suis orientée en terminologie vers la thématique de la conversion piézoélectrique. Du point de vue de la recherche documentaire, ce microdomaine est au cœur des enjeux de la récupération d'énergie par voie piézoélectrique (et au cœur de mon texte). En revanche, s'il me permet en terminologie de contourner le piège d'une liste rébarbative d'éléments composant un récupérateur d'énergie, il ne se prête absolument pas à la hiérarchisation de termes du type arborescence. Ce point est largement abordé dans mon commentaire de terminologie.

Aujourd'hui, quelques jours avant la remise des mémoires, je me rends compte que le microdomaine que j'ai traité est extrêmement spécifique et qu'il n'est pas tout à fait en adéquation avec mon texte. En effet, pour restreindre mon champ d'investigations, j'ai centré ma recherche sur l'optimisation d'un type particulier de récupérateur (le type poutre encastrée-libre) qui n'est pas celui qui a été choisi par mes auteurs (diaphragme). J'ai donc dû faire des recherches annexes pour comprendre toute la partie relative à la mécanique des fluides de mon article. Néanmoins, je pense que ce choix était judicieux : mon article se place

dans une optique résolument novatrice en décrivant un procédé qui n'a jusque-là jamais été exploité et le peu de résultats concrets qui en découle fait que ce procédé n'a pas été repris par la suite.

Présentation du domaine

La **piézoélectricité** est la propriété qu'ont certains matériaux de se polariser électriquement sous l'effet d'une contrainte (**effet direct**), ou au contraire de subir une déformation mécanique sous l'effet d'un champ électrique (**effet inverse**). Ces deux propriétés réciproques se retrouvent sous l'appellation plus scientifique d'**effet piézoélectrique**.

Aujourd'hui, cette technologie est particulièrement étudiée pour être intégrée à des **réseaux de capteurs sans fil** (**WSN**). Ces réseaux qui sont composés de **microsystèmes électromécaniques** (**MEMS**) sont déployés dans des **milieux hostiles**, difficilement accessibles. L'enjeu est donc de trouver de nouvelles sources d'énergie afin de rendre ces microsystèmes énergétiquement autonomes. Pour cela, les chercheurs cherchent à exploiter les **sources d'énergie ambiantes** présentes dans ces milieux, comme la chaleur ou les **vibrations**.

La **récupération d'énergie vibratoire** permet justement de récupérer l'énergie des **vibrations** présentes dans l'environnement. Elle se décline en **récupération d'énergie piézoélectrique**, **récupération d'énergie électromagnétique** et **récupération d'énergie électrostatique** qui sont respectivement utilisées par les **récupérateurs piézoélectriques**, **récupérateurs électromagnétiques** et **récupérateurs électrostatiques**. De nombreux chercheurs privilégient la solution piézoélectrique, en raison des propriétés des **matériaux piézoélectriques** : forte **densité de puissance**, bon **facteur de qualité**, **couplage électromécanique** élevé.

Un récupérateur piézoélectrique typique se compose d'une **structure vibrante**, elle-même composée d'une **base** et d'une **poutre encastrée-libre** sur laquelle se trouvent une **masse sismique** et une ou plusieurs couches de **matériau piézoélectrique**. Chaque élément du récupérateur a un rôle dans le processus de récupération d'énergie.

La structure vibrante possède une **fréquence de résonance** et un **mode de vibration**. Ces caractéristiques lui permettent de répondre à la **fréquence d'excitation** générée par les vibrations. Cette fréquence d'excitation dépend de l'**amplitude** des vibrations, de leurs **fréquences** et de leur **accélération**. Pour faire correspondre la fréquence d'excitation à la fréquence de résonance de la structure vibrante, on utilise une **masse sismique** qui provoque un **amortissement** de la fréquence de résonance de la structure vibrante. L'**excitation** (mise en vibration) de la structure a alors lieu, ce qui provoque une **oscillation** de la base. Cette oscillation se répercute sur le matériau piézoélectrique qui subit alors une **déformation** et produit en retour une **tension** (par effet direct).

Pour récupérer la tension produite, des **électrodes** sont disposées à la surface du matériau piézoélectrique. La tension est ensuite déchargée dans une **résistance de charge** qui symbolise le circuit électrique à alimenter. Ce processus de décharge de la tension permet de

déterminer la **réponse électrique** du récupérateur en termes de **puissance**, **tension**, **énergie**. Les valeurs auxquelles s'intéressent les chercheurs sont la **tension de sortie**, la **puissance de sortie** et la **puissance instantanée**. En effet, ces trois critères leur permettent de caractériser les récupérateurs d'énergie qu'ils conçoivent et de les comparer entre eux.

LA DÉMARCHE DE RECHERCHE

Des débuts difficiles

1) Le piège de la vulgarisation

Revenons à notre recherche documentaire. J'avais beaucoup exploité des textes de vulgarisation, notamment des articles grand public sur les applications « voyantes » de la piézoélectricité. Cette production a été un piège pour moi.

À force de lire ce genre d'articles sur des innovations à taille humaine (boîte de nuit, chaussures, chargeurs de téléphones, etc.), j'en avais conçu une idée fausse de la piézoélectricité. Je pensais en effet que la piézoélectricité était une énergie verte destinée à des applications à taille humaine, au même titre que le photovoltaïque ou l'éolien. Ce n'est que peu de temps avant mes présoutenances que je me rendis compte que je m'étais leurrée. J'illustrai cette erreur dans ma présentation de présoutenance : une éolienne, des panneaux solaires sur une maison, un récupérateur piézoélectrique… pas plus gros qu'une pièce de 2cts. En effet, la piézoélectricité n'a pas vocation à produire autant d'électricité que les autres sources d'énergie renouvelable citées plus haut. Il s'agit d'une solution envisagée pour l'alimentation de réseaux de capteurs autonomes miniatures. Solution moins voyante et moins imposante que d'autres énergies renouvelables, mais tout aussi révolutionnaire (et aux applications industrielles plus variées).

2) De l'importance du terme juste

Je pense aujourd'hui que ce décalage par rapport à la réalité de mon domaine est en grande partie dû au terme que j'avais employé pour ma recherche : « piézoélectricité ». Je pensais au départ que mon domaine, c'était la piézoélectricité. J'avais donc utilisé ce mot pour mes recherches. Cependant, quand je commençai à faire mes fiches terminologiques et que je voulus faire la première sur le terme « piézoélectricité », je me rendis compte que je n'avais que très peu d'occurrences de ce terme dans mon corpus, en français comme en anglais.

Cela me semblait étonnant. De plus, je n'arrivais pas à définir ce terme. Qu'est-ce que la piézoélectricité ? À cette question, toutes les définitions que je trouvais répondaient : « […] propriété d'un matériau à produire de l'électricité lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique. L'effet inverse consiste pour un matériau piézoélectrique à produire une contrainte mécanique lorsqu'il est soumis à une charge électrique. » Et qu'est-ce alors que « l'effet piézoélectrique » ? Exactement la même chose. À ce détail près que le terme « effet piézoélectrique » semble être beaucoup plus souvent employé dans le discours scientifique.

Je pense donc que le terme « piézoélectricité » n'est pas pertinent pour faire une recherche de textes spécialisés dans ce domaine.

3) La (mauvaise) stratégie de l'écureuil

L'un des problèmes que j'ai rencontrés cette année est d'avoir voulu à tout prix collecter le plus de textes possible pour avoir rapidement un corpus à exploiter. Je crois que cette stratégie m'a fait perdre beaucoup de temps.

Dès l'année dernière en M1, nous avions appris à collecter des textes en conservant leurs références pour les introduire dans un corpus, afin de les interroger à l'aide d'un concordancier. Cette approche est valable d'un point de vue que j'appellerais collocationnel. Je ne suis pas sûre qu'elle le soit du point de vue de la traduction, de la recherche documentaire et même de la terminologie.

En effet, j'ai du mal à concevoir qu'il soit possible d'acquérir une connaissance d'un domaine en exploitant des textes au moyen d'un concordancier. J'ai énormément appris à partir du moment où j'ai commencé à lire les textes de mon corpus. Je crois que j'avais inconsciemment mis une barrière entre les textes de vulgarisation qui me serviraient à appréhender mon domaine et les textes spécialisés que j'interrogerais à l'aide d'un concordancier.

Étapes de la réflexion

1) L'évolution des mots

Début de l'année :

« Quel est votre domaine ? » « - La piézoélectricité »

Aujourd'hui :

« Quel est votre domaine ? » « - La récupération d'énergie par voie piézoélectrique »

2) La vision microscopique au détriment du contexte

Pendant ma recherche d'un microdomaine, je me suis orientée vers la conversion des vibrations en électricité ou conversion piézoélectrique. Cet axe de recherche était intéressant, car il m'a permis de trouver de nombreux textes pour mon corpus et d'approfondir ma compréhension de ce principe de conversion piézoélectrique. Cependant, cette approche m'a longtemps enfermée dans la tentative de compréhension d'un phénomène physique extrêmement complexe et m'a fait occulter les enjeux et problématiques de mon domaine.

3) Recentrage

Au bout de quelques mois, je ne savais toujours pas si je devais orienter ma recherche vers « la conversion des ondes mécaniques en énergie électrique » ou vers « comment optimiser les dispositifs de récupération d'énergie utilisant la piézoélectricité ». Au vu de mes recherches, j'ai déterminé qu'il serait sûrement plus judicieux d'étudier la seconde problématique qui semblait bien plus en prise avec les considérations des scientifiques actuels. La première semblait elle aussi attractive, mais était sûrement plus scientifique que

technique et n'avait d'attrait (à mon avis) que pour un non-spécialiste qui souhaiterait comprendre le fonctionnement d'un principe déjà acquis par la communauté scientifique. La seconde, quant à elle, était non seulement en prise avec la réalité scientifique du moment, mais constituait aussi un enjeu majeur pour la production industrielle. J'ai donc adopté une vision plus pragmatique et laissé ma curiosité se sustenter au fil de mes recherches.

Une progression par à-coups : les éléments déclencheurs

1) L'association « récupération d'énergie » et « vibration »

Introduire le mot-clé « récupération d'énergie » dans mes recherches m'a permis de me concentrer sur mon domaine initial, la récupération d'énergie. Néanmoins, il ne suffisait pas seul à restreindre mon champ d'investigation : j'avais toujours trop de résultats. Or j'avais remarqué que les termes « vibration » et « vibratoire » revenaient souvent dans mes textes. Quelques recherches m'ont alors permis de déterminer que la récupération d'énergie piézoélectrique était l'une des branches de la récupération d'énergie vibratoire. Parfois même, les deux termes étaient utilisés indifféremment. J'ai donc associé les termes « récupération d'énergie » et « vibration ». Ce procédé s'est révélé déterminant pour trouver des textes du même type que mon article, c'est-à-dire orientés vers la mise au point de récupérateurs d'énergie.

2) La découverte du Piezo Institute

Aller au plus évident est loin de l'être. C'est à la suite d'une discussion avec Mme Bordet, à l'issue d'un cours de recherche documentaire, que je saisis sans grande conviction dans le moteur de recherche Google : « institut » AND « piézoélectricité ».

Quelle ne fut pas ma surprise lorsque je tombai sur un article de Techniques de l'Ingénieur datant de décembre 2009 intitulé : *Piezo Institute : un pool européen de la recherche sur la piézoélectricité* (cf. Webliographie).

Cet article est en lui-même très intéressant, car il recense les principales thématiques de recherche du Piezo Institute tout en brossant un tableau rapide de l'état de la recherche dans le monde.

Le site du Piezo Institute (qui ne comporte malheureusement pas de version française) est quant à lui une véritable mine d'informations. Très complet sur les axes de recherche européens en matière de piézoélectricité, il recense de nombreux organismes partenaires et contient toute une partie de documentation vulgarisée, notamment un historique très complet et un glossaire sur la piézoélectricité (dans la partie About us).

3) La préparation de la présoutenance

Vers la mi-janvier, j'ai commencé à préparer ma présoutenance. Je me rendais compte que de nombreuses choses m'échappaient encore sur mon domaine. Je n'avais en effet pas de vision claire sur ses principaux enjeux et restait bloquée sur l'opposition systèmes à taille humaine dans les articles de vulgarisation / microsystèmes dans mes articles de spécialité.

Le terme qui me manquait était « autonome ». Je le trouvai quasiment par hasard dans un article sur le site LesEchos.fr : « Des vibrations capables de produire de l'énergie » (cf. Webliographie). Là encore, il semblait s'agir d'un article de vulgarisation sur un système à taille humaine, la piste de danse d'une boîte de nuit. À la différence près que cet article poussait beaucoup plus loin ses investigations en comparant trois types de récupération d'énergie vibratoire et en dressant pour chacun une sorte de liste d'applications. La notion de « réseaux de capteurs autonomes » était en fait ce qui me manquait pour que les éléments épars de compréhension que j'avais collectés s'agglutinent et fassent sens. À la lumière de ces éléments, je déterminai les trois problématiques principales de mon domaine : optimiser le rendement de la conversion piézoélectrique ; exploiter au mieux les différentes fréquences présentes dans l'environnement ; miniaturiser les récupérateurs.

Lors de ma présoutenance, j'illustrai mon erreur en mettant en parallèle les deux images ci-dessous.

Panneaux solaires et éolienne

Récupérateur piézoélectrique

De même, la préparation de cette présoutenance me permit de prendre toute la mesure du terme « harsh environment » que j'avais rencontré à maintes reprises et dont je soupçonnais l'importance, sans pour autant parvenir à le définir. Ce terme est en réalité un pendant à « autonome », puisqu'il fait référence à des environnements dans lesquels il est difficile d'intervenir et où de fait le remplacement ou la maintenance de batteries est périlleux (par exemple dans le cas d'un pacemaker).

Ces deux termes d' « autonomes » et de « harsh environment » m'ont par la suite servi d'indicateurs pour vérifier si les textes que je collectais gravitaient bien autour des mêmes enjeux.

Techniques et outils de recherche utilisés

1) Les techniques de recherche

La recherche par ressemblance

Comme je l'ai indiqué plus haut, j'ai trouvé énormément de textes sur mon domaine. Une façon pour moi de choisir les textes qui intègreraient mon corpus a été de voir lesquels d'entre eux ressemblaient le plus à mon article. Au niveau du vocabulaire employé et des problématiques du domaine, cette approche m'a beaucoup aidée.

La recherche « par tiroirs »

J'ai vite constaté que la recherche d'articles anglais, notamment par le site sciencedirect, ne m'aidait pas forcément à identifier un microdomaine (je trouvais beaucoup d'articles de différents domaines). J'ai donc adapté ma démarche : lors d'une recherche précédente, j'avais relevé les références d'un article sur sciencedirect mais lorsque j'avais voulu le retrouver, impossible. J'ai dû passer par les champs Revue, Volume, Issue, pour pouvoir le retrouver (ni le titre ni l'auteur ne renvoyaient à quoi que ce soit). C'est ainsi que j'ai constaté que la recherche dans sciencedirect était très, voir trop aléatoire. J'ai donc adopté une autre stratégie : regarder dans le champ des articles relatifs au même sujet. Il se trouve que cette méthode est beaucoup plus pertinente et c'est sans doute par ce biais que j'ai trouvé mes articles les plus ciblés.

Je me suis également orientée vers cette technique en français, en exploitant les bibliographies des thèses que j'avais déjà récupérées. La bibliographie de la thèse Dupe_2011 a notamment été une ressource importante pour trouver des thèses et articles supplémentaires en français.

2) Les outils de recherche sur Internet

Les moteurs de recherche génériques

Au cours de cette année universitaire, j'ai utilisé de nombreux moteurs de recherche.

Google

Je ne peux faire autrement que de commencer par mentionner **Google**. Comme je l'ai indiqué dans la première partie de ce protocole, c'est par ce biais que j'ai commencé à rechercher des textes. Mes premières recherches n'étaient pas fines, mais je savais exploiter les différences qui existaient entre **google.fr**, **google.com**, **google.co.uk** et **google.de**. En entreprise, j'ai d'ailleurs pris l'habitude de travailler en parallèle avec google.fr et google.co.uk (que je préfère à google.com qui a tendance se reconfigurer automatiquement selon mes habitudes de navigation).

De plus, je conseille de recourir autant que possible aux équations de recherche : l'opérateur + m'a été particulièrement utile pour restreindre le nombre de mes résultats. J'ai également pu trouver de nombreux équivalents à mes termes anglais au moyen d'hypothèses partielles que

je complétais par le caractère ***** et des définitions en utilisant la formule **define: "terme"**. Sans oublier l'**usage des guillemets**, indispensable pour obtenir l'expression exacte.

Par ailleurs, au cours de la constitution de mon glossaire, j'ai adopté une méthode de recherche par chaînes de caractères, par opposition aux recherches précédemment effectuées par lesquelles je cherchais à acquérir une connaissance du domaine. En plus de la formule **define: "terme"**, j'ai utilisé les requêtes **« "terme", c'est-à-dire »** et **« Un "terme" est un ».** Ces requêtes m'ont renvoyée vers de nombreux glossaires de sites industriels ou de formation, ce qui m'a fourni des définitions concises et précises de termes.

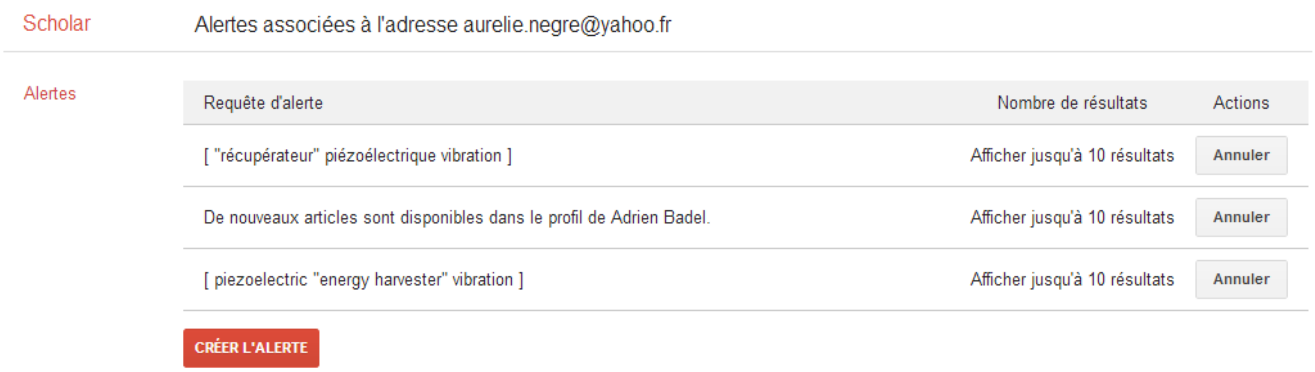
Enfin, je recommande l'utilisation de la recherche **"terme français" cat.inist** pour récupérer de la documentation scientifique en français (cat.inist est une base de données d'abstracts).

Google Scholar

Google Scholar est un outil précieux dans la recherche de documents spécialisés.

Pour ma recherche documentaire, j'ai surtout exploité les fonctions relatives aux dates. Mon domaine étant très actif, j'ai en effet voulu obtenir des documents très récents, en **filtrant les résultats antérieurs à 2013**.

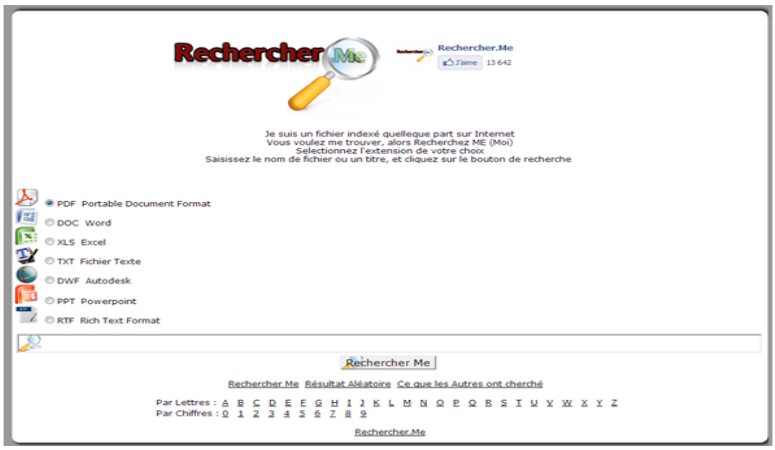
J'ai également mis en place les **alertes** suivantes afin de maintenir une veille sur mon sujet et d'être informée des dernières publications de mon expert :



Rechercher me (www.rechercher.me)

Rechercher me est un moteur de recherche qui permet de récupérer par téléchargement un fichier qui a été mal indexé sur Internet. Il ne possède aucune fonction avancée et nécessite de choisir le format de fichier recherché (PDF, Word, Excel, Fichier Texte, Autodesk, PowerPoint, Rich Text Format).

Ce moteur de recherche extrêmement basique est une bonne surprise : il est très ergonomique et fait apparaître des documents introuvables sur Google. Par cette voie, j'ai collecté plusieurs **documents en français**, notamment des **cours** (il me suffisait pour cela de spécifier un format PowerPoint). Seul bémol : le manque de traçabilité des documents.


Rechercher Me
Rechercher.Me
Je suis un fichier indexé quelleque part sur Internet
Vous voulez me trouver, alors Recherchez ME (Moi)
Selectionnez l'extension de votre choix
Saisissez le nom de fichier ou un titre, et cliquez sur le bouton de recherche
PDF Portable Document Format
DOC Word
XLS Excel
TXT Fichier Texte
DWF Autodesk
PPT Powerpoint
RTF Rich Text Format
Rechercher Me
Rechercher Me Résultat Aléatoire Ce que les Autres ont cherché
Par Lettres : A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
Par Chiffres : 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
Rechercher.Me

Le Mind-Mapping

Ce que j'entends par Mind-Mapping est la recherche par termes associés. J'ai beaucoup utilisé cette technique avec les moteurs de recherche spécialisés **Scirus**, **Clusty** et **Exalead**. Parmi ces trois outils, celui qui m'a fourni le plus de textes est Scirus (plus proche de mon domaine que les deux autres). Je présente donc ici la façon dont j'ai procédé sur Scirus, sachant que j'ai reproduit le même schéma avec Clusty et Exalead.

Sur **Scirus**, lorsqu'on saisit par exemple le terme **piezoelectric conversion**, le moteur de recherche propose les termes associés suivants :

- piezoelectric material
- piezoelectric element
- cantilever
- electrode
- ferroelectric
- vibration energy
- dielectric
- electrodes
- electromechanical coupling
- piezoelectric layer

Sur cet exemple, j'ai aiguillé ma recherche sur « piezoelectric conversion » (« cantilever ») afin de restreindre le nombre de résultats, en me basant sur le nombre d'occurrences très élevé du terme **cantilever** dans mon article.

Je choisissais ensuite un article qui me renvoyait sur un site de référence (par exemple Springer), choisissais dans la liste d'articles associés ceux qui m'intéressaient, puis retournais sur Scirus. Après quoi je précisais un nouveau terme dans la liste des termes associés de Scirus afin de poursuivre mes recherches.

L'ENT de l'université

L'ENT de l'université propose un accès gratuit à différentes revues spécialisées, classées par thèmes. Cette classification permet non seulement d'identifier les revues proches de celles dans lesquelles on a trouvé des articles pertinents, mais aussi d'accéder directement aux index

des revues et ainsi de trouver des articles qui n'ont pas encore été publiés. Dans le cas d'un domaine très actif, cette méthode permet de se tenir informé des dernières avancées de la recherche et de récupérer des articles extrêmement récents. Dans mon cas, j'ai pu introduire dans mon corpus des articles datés de septembre 2013.

De plus, les sites des revues recensées sur l'ENT proposent souvent différents formats de consultation pour leurs articles, ce qui permet de récupérer des ressources par copier-coller et d'éviter la fastidieuse conversion des fichiers PDFs.

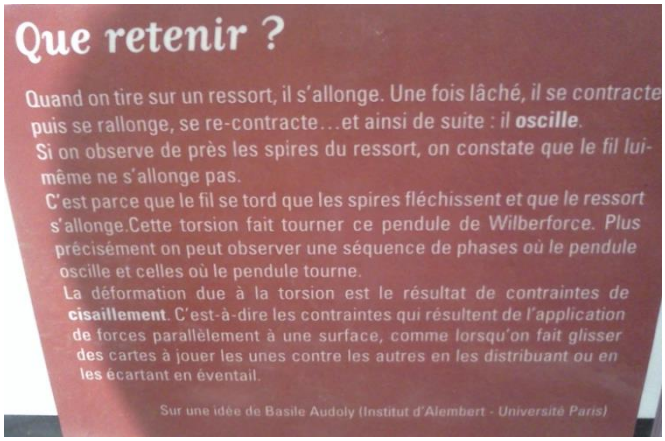
3) Le monde réel

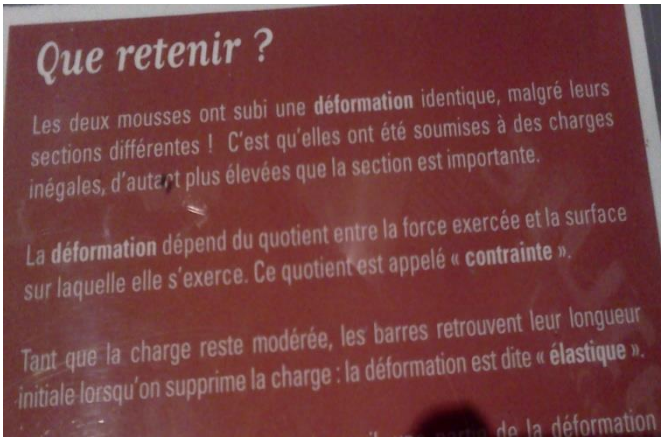
En parallèle de ma recherche de textes, je cherchais à approfondir ma connaissance du domaine en exploitant les ressources du monde réel.

Le Palais de la Découverte et l'exposition : Ruptures, les matériaux roulent des mécaniques

Je ne saurais trop conseiller le Palais de la Découverte aux étudiants travaillant dans le domaine scientifique. Je l'ai redécouvert cette année à l'occasion d'une exposition intitulée : « Ruptures, les matériaux roulent des mécaniques ».

J'avais en effet déterminé que mon domaine se trouvait à la croisée des domaines de la mécanique, de l'électricité et de l'acoustique. Dans le domaine de la mécanique, il s'agissait surtout de déformation des matériaux. Je ne pouvais donc rester indifférente à une exposition-expérience qui semblait traiter du sujet : j'y ai non seulement trouvé des informations très claires sur les bases de la déformation des matériaux, mais aussi des définitions de termes (voir photographies ci-dessous).


Que retenir ?
Quand on tire sur un ressort, il s'allonge. Une fois lâché, il se contracte puis se rallonge, se re-contracte…et ainsi de suite : il oscille.
Si on observe de près les spires du ressort, on constate que le fil lui-même ne s'allonge pas.
C'est parce que le fil se tord que les spires fléchissent et que le ressort s'allonge.Cette torsion fait tourner ce pendule de Wilberforce. Plus précisément on peut observer une séquence de phases où le pendule oscille et celles où le pendule tourne.
La déformation due à la torsion est le résultat de contraintes de cisaillement. C'est-à-dire les contraintes qui résultent de l'application de forces parallèlement à une surface, comme lorsqu'on fait glisser des cartes à jouer les unes contre les autres en les distribuant ou en les écartant en éventail.
Sur une idée de Basile Audoly (Institut d'Alembert - Université Paris)


Que retenir ?
Les deux mousses ont subi une déformation identique, malgré leurs sections différentes ! C'est qu'elles ont été soumises à des charges inégales, d'autant plus élevées que la section est importante.
La déformation dépend du quotient entre la force exercée et la surface sur laquelle elle s'exerce. Ce quotient est appelé « contrainte ».
Tant que la charge reste modérée, les barres retrouvent leur longueur initiale lorsqu'on supprime la charge : la déformation est dite « élastique ».

La recherche en bibliothèque

Bien que cela puisse paraître surprenant, les livres existent aussi (et parfois seulement) en format papier.

J'ai honte de l'avouer, j'ai mis les pieds en bibliothèque il y a seulement quelques semaines. Et sans grand espoir. Internet nous semble tellement complet que nous oublions souvent que certaines personnes ont en amont préparé et classé les ressources dont nous pourrions avoir besoin. Ces ressources se trouvent en bibliothèque. J'ai notamment trouvé récemment le livre

Electromagnetic field theory fundamentals à la bibliothèque de l'université. Ce livre explique pas à pas la théorie de l'électromagnétisme (l'un des pendants de la piézoélectricité) en reprenant des concepts avec lesquels un non-scientifique n'est pas familier.

De plus, le classement des livres en bibliothèque nous permet d'avoir une vision plus claire de la structure de connaissances dans laquelle s'inscrit notre / nos domaine(s).

L'environnement professionnel : les apprentis ingénieurs

À la SNECMA, j'ai pu profiter des lumières des apprentis ingénieurs qui se trouvaient là.

Ceux-ci ont été mes premiers experts : comme je l'ai expliqué plus loin, j'ai mis énormément de temps à trouver un expert. Je pense en effet que j'avais besoin d'acquérir des bases de compréhension avant de pouvoir poser les bonnes questions. J'ai donc eu recours à ces « experts intermédiaires » qui avaient une formation à la fois généraliste et d'un bon niveau (4^{e} et 5^{e} année d'école d'ingénieur).

Je tiens notamment à soulever l'importante contribution de Saïd Bouaziz qui a gentiment accepté de répondre à mes questions dans des domaines aussi variés que l'électricité, la mécanique et la propagation des vibrations. Par son biais, j'ai récupéré des fiches de cours de niveau lycée expliquant les principes généraux de l'électricité (voir ci-dessous) et ai pu comprendre la corrélation entre fréquence, amplitude et oscillation.

Sarah Ravitchanrade m'a également apporté son aide en me confiant un rapport qu'elle avait rédigé en 3^{e} année d'école d'ingénieur sur un stage effectué dans le laboratoire de Thales portant sur les cristaux piézoélectriques. Que son sujet de stage ait porté sur la piézoélectricité tient de la coïncidence et je n'en aurais jamais rien su si je n'avais pas communiqué et posé des questions. On trouve souvent dans son entourage des ressources inespérées.

La constitution du corpus

1) Corpus anglais

Pour constituer mon corpus anglais, j'ai suivi la démarche de recherche que je décris plus haut. J'éviterai donc les redites et ne mentionnerai que mes objectifs.

Mon souhait premier a été de privilégier la quantité afin d'avoir une vision globale du domaine et du vocabulaire employé. Cette approche m'a permis de réunir un corpus d'un demi-million de mots. Mes textes n'ont sans doute pas tous un lien direct avec mon sujet, mais sont d'un niveau de spécialisation très élevé, la plupart étant des thèses ou des articles publiés sur Science Direct.

D'un point de vue terminologique, je pense que mon corpus est tout à fait pertinent. La quantité de textes introduits me permet d'avoir un nombre d'occurrences satisfaisant pour chacun des termes de mon dictionnaire terminologique.

D'un point de vue documentaire, j'ai peu exploité les textes de mon corpus anglais. La documentation qui m'a été la plus utile en langue source est celle que j'ai trouvée dans les

deux livres *Electromagnetic field theory fundamentals* et *Piezoelectric Energy Harvesting*. Leurs références complètes sont données dans la bibliographie sélective.

2) Corpus français

Pour le corpus français, au vu de l'écrasante prépondérance de l'anglais comme langue de publication scientifique, je savais que je risquais de ne trouver que peu d'articles scientifiques et donc d'avoir des niveaux de spécialisation plus variés : spécialiste à spécialiste, spécialiste à futur spécialiste et vulgarisation. J'ai donc essayé de rester au maximum dans le domaine universitaire (notamment par le biais de thèses et de publications) afin de conserver un bon niveau de spécialisation et donc de pouvoir travailler sur les équivalents des termes anglais et leurs collocations.

Je conseille ici de ne pas juger son corpus français sur le nombre de mots qu'il contient, mais plutôt sur son nombre de textes. En effet, il n'est pas rare de trouver 50 occurrences d'un terme provenant uniquement de deux auteurs différents. Ce phénomène est dû au fait que la grande majorité de textes français spécialisés est des thèses, qui augmentent artificiellement la taille du corpus sans pour autant le rendre pertinent d'un point de vue terminologique.

D'un point de vue documentaire, je recommande de lire au maximum les textes de son corpus, principalement les **introductions de thèses** qui dressent souvent un état de l'art de la recherche sur le sujet qu'elles abordent (et sont d'un niveau relativement accessible).

3) Analyse du corpus

Caractéristiques du corpus anglais :

Types de documents	Dates
87 % d'articles de recherche 4 % de thèses	78 % entre 2010 et 2013, dont 41 % entre 2012 et 2013

Caractéristiques du corpus français :

Types de documents	Dates
35 % de thèses 19 % d'actes de colloque 16 % d'articles de recherche	72 % entre 2010 et 2012

Comme on peut le voir ci-dessus, l'écrasante majorité des textes de mon corpus anglais sont des articles de recherche, écrits entre 2010 et 2013. Mon corpus français est un peu différent puisqu'il présente une majorité de thèses (comme on pouvait s'y attendre). Néanmoins, ce nombre est égal à la somme des articles de recherche et des actes de colloque, ce qui est plus rare en français. Tout comme le corpus anglais, mon corpus français réunit des documents très récents. À noter cependant : aucun texte de mon corpus français n'a été écrit en 2013. Ce détail peut s'expliquer par le déroulé d'une année universitaire (les thèses sont rendues pendant l'été et soutenues en septembre).

L’expert

Ma recherche d’un expert s’est déroulée en trois étapes.

J’ai commencé mes recherches complètement à l’aveuglette : ma compréhension de mon domaine était tellement approximative que je ne savais ni qui contacter ni comment formuler mes questions. Dans un premier temps, je suis donc passée par le biais de mes textes français, notamment par les mémoires et thèses que j’avais collectées : j’ai ainsi joint plusieurs des personnes qui avaient encadré ces travaux, mais n’ai reçu aucune réponse positive. Mettant ces refus sur le compte de mon inexpérience, je choisissais d’approfondir mes connaissances avant de renouveler mes tentatives.

Pourtant, lorsque quelques mois plus tard je me remis à ma recherche, je me rendis compte que les refus et absences de réponses continuaient à être légion. Mon modèle de lettre était pourtant en tout point similaire à celui de mes camarades. Je ne reçus qu’une seule réponse positive, aux alentours du mois de janvier. Ma satisfaction ne fut malheureusement que de courte durée, car dès mes premières questions, mon expert s’évapora dans la nature.

Je ne repris mes recherches qu’au mois de mars. Je n’avais en effet rencontré que peu de difficultés pendant la traduction de mon article. En revanche, mon travail de terminologie nécessitait une compréhension plus fine de certains concepts : j’avais véritablement besoin de l’éclairage d’un expert. Je reçus une réponse positive de la part d’Adrien Badel, maître de conférences à l’Université de Savoie, membre du Laboratoire Systèmes et Matériaux pour la MEcatronique (SYMME). Je n’étais pas rassurée pour autant : mon dernier expert m’avait filé entre les doigts et j’avais peur que celui-ci ne fasse de même. J’avais de plus accumulé un bon nombre de questions et craignais de le décourager. J’ai alors exposé mon problème à Mme Descaves qui m’a prodigué de précieux conseils sur la façon de s’adresser à un expert et sur la façon de le questionner.

Aujourd’hui, mon expert répond régulièrement à mes questions et se montre extrêmement pédagogue dans ses reformulations. Je pense que pour la réalisation du dictionnaire terminologique, l’aide d’un expert est indispensable. J’en donne pour preuve un extrait révélateur de ma correspondance avec mon expert :

> **De :** Adrien Badel <adrien.badel@univ-savoie.fr>
> **À :** aurélie nègre <aurelie.negre@yahoo.fr>
> **Envoyé le :** Mardi 9 avril 2013 11h27
> **Objet :** Re: Mémoire sur la récupération piézoélectrique
>
> Bonjour,
>
> Voici quelques explications:
>
> […]
>
> Puissance instantanée: c'est la puissance à un instant t
>
> Puissance moyenne (parfois juste "puissance"): c'est la valeur moyenne de la puissance
>
> Puissance de sortie: puissance générée par un dispositif

Bien cordialement,

Adrien

aurélie nègre

mardi 9 avril 2013 12:24

Merci beaucoup pour vos explications.

Lorsque l'on dit d'un dispositif "qu'il produit une puissance de ... W", on parle donc de la puissance de sortie de ce dispositif ?

Bien cordialement,

Aurélie

De : Adrien Badel <adrien.badel@univ-savoie.fr>
À : aurélie nègre <aurelie.negre@yahoo.fr>
Envoyé le : Mardi 9 avril 2013 12h39
Objet : Re: Mémoire sur la récupération piézoélectrique

tout à fait.

Les manques à pallier

Dans cette partie, j'aimerais résumer les points de ma recherche qui mériteraient d'être améliorés et/ou approfondis.

Tout d'abord, je pense qu'il m'aurait été utile de commencer par identifier les grands principes que j'avais besoin de connaître : électricité, mécanique, acoustique. Au fil de mes recherches, j'en ai acquis une bonne connaissance en glanant des détails qui ont fini par s'agencer et par faire sens. Néanmoins, je pense que mon travail aurait pu être plus efficace si je m'étais documentée en amont de ma recherche. Dans cette optique, j'indique dans ma bibliographie comment acquérir ces bases de façon ludique.

De plus, il faudrait approfondir la partie « historique » de mes recherches. Bien que j'aie dressé les grandes lignes du développement de la piézoélectricité, je pense qu'il serait intéressant de se plonger dans des textes plus anciens et peut-être plus détaillés. Pour ma part, j'ai écarté cette option pour répondre aux exigences du corpus (pas de textes ayant plus de 10 ans).

Enfin, les questions d'indexation sont essentielles dans tout travail de recherche. Dans mon cas, je pense avoir trouvé une indexation efficace pour les textes de mon corpus, sous forme de fichier Excel. En revanche, j'aurais souhaité trouver un meilleur système de classement pour les documents annexes que je récupérais au fur et à mesure de mes recherches.

LES CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DU DOMAINE

Présentation de la production documentaire du domaine

1) Qui publie quoi ?

Des auteurs en pagaille

Je crois pouvoir dire que jamais cette année je n'ai été confrontée à un problème de « silence » durant ma recherche documentaire. Je ne suis même pas sûre que je puisse parler de « bruit ». Je pense simplement que le domaine sur lequel j'ai choisi de travailler était et reste extrêmement actif. Pour illustrer cette actualité, je prends l'exemple de mon corpus : les trois quarts des textes qui le composent ont été écrits après 2010, dont plusieurs en 2012 et 2013. Pour cette raison, j'ai mis en place un système de veille sur la recherche « piezoelectric "energy harvester" vibration », sur Science Direct et Google Scholar.

Cette production débordante a néanmoins de lourdes conséquences sur la terminologie de mon domaine. Je le mentionne ici, car il s'agit aussi d'un frein dans la recherche documentaire. Mon domaine est très actif. De nombreux chercheurs mènent des travaux et publient en ce moment même. Bien évidemment, la majorité de cette production se fait en anglais. Sauf que le paysage documentaire de mon domaine est majoritairement asiatique (principalement coréen et chinois). Il ne s'agit donc pas d'anglophones de naissance. Cette caractéristique occasionne des approximations et des erreurs de terminologie dans les textes (voir commentaire de terminologie et de traduction), ce qui rend le domaine encore plus compliqué à cerner. De plus, la cadence de publication effrénée de mon domaine a des effets inattendus, par exemple l'usage abusif du copier-coller d'un auteur à l'autre (paragraphes entiers), ce qui fausse l'identification et l'attestation des termes.

Enfin, il n'existe pas de « diplôme en piézoélectricité ». J'ai mené une recherche sur les titres des différents auteurs de mon corpus. La moitié environ eux sont issus d'une formation en mécanique, l'autre moitié d'une formation en génie électrique.

La place des laboratoires

Je ne veux pas trop m'avancer sur l'organisation de la recherche dans les autres pays du monde, mais en ce qui concerne la France, tous mes auteurs sont issus de laboratoires. La plupart de ces laboratoires sont implantés au sein d'universités et regroupés autour de grands pôles comme le CNRS, MINATECH ou LAAS (pour n'en citer que quelques-uns).

En effet, si au plan européen la création du Piezo Institute a permis de fédérer les équipes de recherche, cette même tendance de regroupement a lieu au niveau national et au niveau régional. Cette tendance s'explique évidemment par des questions de budget, mais aussi dans mon domaine par les différentes spécialités nécessaires pour modéliser et concevoir un récupérateur piézoélectrique : spécialistes en microélectronique ou mécanique / spécialistes des procédés de fabrication.

Pourquoi l'Asie ?

La piézoélectricité a été découverte par les frères Curie, en France. Plusieurs années plus tard, Paul Langevin, français lui aussi, a mis au point le sonar (première application industrielle de la piézoélectricité). Néanmoins, pendant la seconde moitié du XXe siècle, et malgré l'apparition de nouveaux matériaux piézoélectriques démultipliant les possibilités d'applications de la piézoélectricité, seuls les États-Unis et le Japon ont mené des recherches en piézoélectricité. Depuis, la Corée et la Chine ont pris le relais. L'Europe quant à elle essaye de refaire son retard. C'est dans ce but qu'a été créé en 2008 le Piezo Institute, regroupement de chercheurs européens.

De plus, dans l'article des Techniques de l'Ingénieur sur le Piezo Institute (cf. Webliographie), le co-initiateur du projet, Marc Lethiecq, nous apprend que l'un des enjeux au niveau européen est de « développ[er] de nouvelles céramiques piézoélectriques, ne renfermant aucun matériau qui présente un danger pour l'environnement, […] [le] matériau standard disponible sur le marché [étant] le PZT […] constitué […] de zirconium, de titane et de plomb ». Cette volonté écologique constitue à mon avis une explication plausible sur le retard pris par l'Europe en matière de récupérateurs d'énergie piézoélectrique : en effet, dans les textes de mon corpus, le matériau majoritairement employé est le PZT décrié ci-dessus.

2) Pour quel(s) public(s) ?

La production documentaire de mon domaine regroupe de nombreux types de documents : cours en ligne, articles de recherche, rapports, brevets…

La plupart de ces documents sont destinés à la communauté scientifique : de nouveaux matériaux sont découverts, différentes méthodes sont expérimentées, ce qui permet de mettre en place de meilleures solutions. La communication autour de ces découvertes est donc très active (articles de recherche, congrès).

De plus, la prédominance de l'anglais dans la communauté scientifique promeut la coopération entre laboratoires et la formation d'organismes de recherche internationaux.

Parmi les autres publics visés, on peut citer les jeunes chercheurs (propositions de stage, offres d'emploi et postdoc), les apprenants (cours en ligne, manuels) ou encore les industriels (brevets).

3) Ressources spécifiques

La plupart des textes que j'ai collectés sont publiés dans des revues de science des matériaux. Que ce soit en français ou en anglais, on ne trouve dans ces textes aucune définition des concepts utilisés, ni même de présentation claire de ce qui a été fait par le passé. D'après une conversation que j'ai eue avec Mme Bordet, ce trait est une des caractéristiques de la production scientifique en science des matériaux.

J'ai également trouvé de très nombreuses descriptions de brevets, en anglais comme en français. Cette documentation reste malheureusement difficile à exploiter, tant du point de vue

de la compréhension du domaine que du point de vue terminologique (interrogation de corpus à l'aide d'un concordancier). Je le signale tout de même ici, car l'abondance de cette ressource dénote encore une fois la très forte activité de recherche de ce domaine et la volonté de son application dans le domaine industriel.

Position, problem, solution

Dans cette partie, je souhaite formuler en termes simples et concis quel est l'état du domaine, quels sont les verrous qu'il reste à débloquer et quelles sont les pistes proposées par la communauté scientifique.

1) Position

Aujourd'hui, la prolifération de réseaux de capteurs autonomes a donné lieu à de nombreuses recherches dans le domaine de la récupération d'énergie au moyen de la piézoélectricité. Il est en effet essentiel pour les années à venir de trouver comment remplacer les sources d'énergie finie à l'échelle micro et nanométrique. Actuellement, les récupérateurs piézoélectriques sont une des solutions envisagées : ils permettent de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique et même si leurs rendements sont faibles, ils demeurent suffisants pour l'alimentation de microsystèmes. De plus, les matériaux piézoélectriques sont suffisamment robustes pour être intégré dans des milieux hostiles.

2) Problem

Plusieurs verrous s'opposent à l'utilisation de récupérateurs piézoélectriques en tant que microsystèmes électromécaniques (MEMS) :

- Verrous technologiques :
    - **Miniaturisation** : Pour être intégrés dans des microstructures, les récupérateurs piézoélectriques doivent être miniaturisés. Cependant, il est très difficile de conserver un rendement correct lorsqu'on miniaturise un récupérateur piézoélectrique (à cause notamment de la densité de puissance d'un matériau qui dépend de son volume).
    - **Adaptation de fréquence** : Les récupérateurs piézoélectriques utilisent l'énergie mécanique des vibrations présentes dans l'environnement. Pour cela, il est nécessaire que la fréquence de résonance du récupérateur s'ajuste à la fréquence des vibrations, ce qui passe par l'optimisation du design du récupérateur.
- Verrou sociétal :
    - **Environnement** : Les matériaux piézoélectriques les plus performants actuellement contiennent du plomb.
    - **Nanotechnologies** : Les nanotechnologies sont au cœur de nombreux débats sur les problèmes de santé, d'environnement (manipulation des atomes à l'échelle micro et nanométrique) et d'éthique (dissémination de nanomatériaux à l'insu des citoyens).

3) Solution

De nombreux chercheurs sont actuellement à l'œuvre pour lever les verrous technologiques mentionnés ci-dessus. Pour résoudre les problèmes de miniaturisation et d'adaptation de fréquence (qui participent de l'optimisation des récupérateurs), l'approche expérimentale est privilégiée : des équipes de chercheurs travaillent sur la modélisation des phénomènes en jeu afin d'en retirer des paramètres théoriques mis ensuite en pratique à travers la conception de prototypes. Les grands axes d'amélioration envisagés sont la forme du récupérateur, ses dimensions et le matériau employé. Aujourd'hui, plusieurs équipes ont proposé des prototypes viables.

Les chercheurs prévoient également pour les années à venir l'apparition de nouveaux matériaux susceptibles d'avoir des propriétés améliorées par rapport aux matériaux piézoélectriques existants. Cet aspect de la recherche est lui aussi très actif, dopé notamment par les récents développements en matière de micro et nanotechnologies (domaine très actif lui aussi qui bénéficie du soutien des industriels).

Concernant le verrou sociétal des nanotechnologies, un grand débat citoyen a été organisé en France en 2009-2010. Ce débat qui n'eut pas le succès escompté (de l'aveu même des organisateurs, voir rapport indiqué en bibliographie) fut entaché par des manifestations d'opposants farouches aux nanotechnologies, ces derniers arguant du fait que les nanotechnologies étaient déjà en voie d'être industrialisées, sans que le public ait été consulté.

Ainsi, s'il est fort probable que les verrous technologiques à la faisabilité de la récupération d'énergie piézoélectrique soient bientôt levés, il n'en est pas de même pour les verrous sociétaux qui feront certainement parler d'eux dans les prochaines années.

BILAN

Cette année a été une découverte. La phrase peut sembler banale. Et pourtant.

Quand j'emploie le mot « découverte », je l'emploie à dessein. C'est en effet un monde que j'ai découvert cette année, bien au-delà de mon domaine. Avant cette année, je n'avais aucune idée de l'organisation d'un paysage documentaire. Pour moi, tout se résumait à Internet et pour rechercher une information ou un document sur Internet, tout se résumait à Google.

Grâce au cours de recherche documentaire et à ce travail de mémoire, j'ai pu apprendre à me servir de nouveaux outils de recherche, à formuler des requêtes, à diversifier mes sources, à les vérifier, etc. J'en ai retiré une vision plus claire de la manière dont était organisée la documentation.

Pour parler plus spécifiquement de mon domaine, j'ai découvert là aussi un autre univers : les enjeux de la publication scientifique, l'organisation des équipes et des organismes de recherches, la place des industriels par rapport à la recherche expérimentale.

Tout au long de mon travail de recherche documentaire, j'ai fait des choix, à tâtons au départ, puis de plus en plus réfléchis. Je pense notamment avoir réussi à délimiter et décrire mon domaine qui est extrêmement complexe et émergeant. Cette compréhension m'a permis de compiler en bibliographie les ressources nécessaires à de futurs apprenants du domaine souhaitant continuer le travail entrepris.

ANNEXES

Annexe 1 : Bibliographie sélective et commentée

Annexe 2 : Article de WE DEMAIN

Annexe 2 : Texte de traduction « A shear mode piezoelectric energy harvester based on a pressurized water flow »

Annexe 1 : Bibliographie sélective et commentée

Mode d'emploi :

Cette bibliographie présente quelques-unes des sources que j'ai utilisées tout au long de l'année pour découvrir, parcourir et approfondir mon domaine. Elle est principalement destinée à un futur apprenant souhaitant continuer le travail que j'ai entrepris. Dans cette optique, les références sont organisées selon différents niveaux de spécialisation qui correspondent respectivement à un premier contact avec le domaine, une acquisition des bases des sous-domaines impliqués et un approfondissement avec un accès à la documentation spécialisée. J'ai également indiqué dans une partie plus générale quelques ressources linguistiques qui m'ont été particulièrement utiles au cours de l'année. Par ailleurs, je pars du principe que le futur apprenant souhaitant exploiter cette bibliographie peut sans mal jongler entre les deux langues concernées que sont le français et l'anglais. Je ne fais donc qu'une simple mention de la langue à la fin de chaque référence.

Texte de traduction

Dung-An WANG, Nine-Zeng LIU. *A shear mode piezoelectric energy harvester based on a pressurized water flow.* Sensors and Actuators A: Physical, Volume 167, Issue 2, June 2011, Pages 449-458. **EN**

URL : http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2011.03.003

Expert

Adrien BADEL **FR**

Courriel : adrien.badel@univ-savoie.fr

Titre : Maître de conférences

Institution : Université de Savoie, Laboratoire SYMME

Adresse : Laboratoire SYMME, Domaine Universitaire, BP 80439, 74944 Annecy le vieux

Fiche personnelle : http://www.polytech.univ-savoie.fr/index.php?id=1244&L=0

Ses publications : http://scholar.google.com/citations?user=_7EBsHAAAAAJ&hl=en

Premiers contacts avec le domaine

Il existe un fossé entre les articles grand public qui traitent pour la plupart d'applications « sensationnelles » de la piézoélectricité (non pertinentes) et la littérature hautement spécialisée (jargonneuse). La vulgarisation grand public pertinente est plus rare.

Introduction

Crystal et Bien-être - Produits bio et naturels. 2013. **FR**

URL : http://www.crystal-bien-etre.fr/lire/dossiers-mineraux-3/piezoelectricite-4.html

- Informations pratiques sur la piézoélectricité et bref historique. L'auteur se concentre sur l'aspect minéralogique des matériaux piézoélectriques.

WIKIPEDIA. Article sur la piézoélectricité. 2012. **FR**

URL : http://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9

- Article bien vulgarisé qui passe en revue les principes physiques à l'œuvre en piézoélectricité ainsi que les différentes applications possibles. La partie sur les matériaux est très complète.

Energy Harvesting Journal **EN**

URL : http://www.energyharvestingjournal.com/

- Ce site propose une veille des derniers développements industriels en matière de récupération et de stockage d'énergie. Il est hébergé et alimenté par IDTechEx, société qui fournit des rapports de recherche et études indépendantes à des grands groupes industriels ou gouvernements. Les articles publiés quotidiennement sont donc de très bon niveau et s'adressent à un public semi-spécialisé.

Contexte

Comité d'Experts Micro et Nano Systèmes du CNRS-STIC. *Rapport de prospective sur les micro et nano systèmes*. 2005. **FR**

Téléchargeable grâce au lien suivant :
http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=rapport+de+prospective+sur+les+micro+nano+syst%C3%A8mes&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cnrs.fr%2Finsis%2Fpresentation%2Fdocs%2FRapport-prospective-micro-nano-systemes.doc&ei=mJTOUannM5HBtAb82IGoDw&usg=AFQjCNFKnrXeZS53asPUcqW9cdG1XxsEgw&bvm=bv.48572450,d.Yms

- Excellente présentation du domaine des MEMS (dont font partie les récupérateurs d'énergie piézoélectriques) selon l'approche Position-Problem-Solution : apport des micro et nano systèmes / présentation des problématiques scientifiques associées / forces et faiblesses avec pistes d'amélioration.

Acmite Market Intelligence. *World Piezoelectric Device Market (Abstract).* Acmite Market Intelligence. Market report, June 2011. **EN**

URL : http://www.acmite.com/brochure/Brochure-Piezoelectric-Device-Market-Report.pdf

- Résumé du rapport d'Acmite Market Intelligence qui décrit brièvement l'état actuel du marché des dispositifs piézoélectriques. La table des matières du rapport est également fournie, ce qui donne une vue globale et structurée du domaine.

Polémiques

Dragan Damjanovic. *Couplage électromécanique dans les matériaux piézoélectriques sans plomb*. Laboratoire de céramique, EPF Lausanne, 2013. **FR**
URL : www.nfp62.ch/...materiaux.../couplage-electromecanique-materiaux-piezoelectriques-sans-plomb.aspx

- Description d'un projet de recherche portant sur le développement de matériaux piézoélectriques sans plomb. Ce document permet de mettre l'accent sur la problématique de l'utilisation du plomb dans la récupération d'énergie au moyen de matériaux piézoélectriques.

Philippe DESLANDES, Président de la Commission Nationale du Débat Public (CNDP). *Bilan du débat public sur le développement et la régulation des nanotechnologies, 15 octobre 2009 – 24 février 2010*. Publié le 9 avril 2010. **FR**

URL : http://debatpublic-nano.org/_script/ntsp-document-file_download7d8e.pdf?document_id=503&document_file_id=761

- Compte-rendu du débat avorté sur les nanotechnologies qui s'est tenu en 2009-2010. Permet de mettre en perspective les craintes et questions soulevées par le développement des nanotechnologies dans l'opinion publique par rapport au discours scientifique.

Organisations

Piezo Institute **EN**

URL : www.piezoinstitute.com

- Site très complet sur les axes de recherche européens en matière de piézoélectricité et qui recense de nombreux organismes partenaires. On y trouve toute une partie de documentation vulgarisée, notamment un historique très complet et un glossaire sur la piézoélectricité (dans la partie About us).

SINTEF piezoMEMS Competence Center **EN**

URL : http://www.piezomicrosystems.com/

- Pôle de la SINTEF (fondation norvégienne pour la recherche scientifique et industrielle) consacré aux microsystèmes piézoélectriques. Consulter notamment les parties « Technology » et « Applications ».

- La SINTEF a organisé entre 2010 et 2012 le projet piezoVolume réunissant trois groupes de recherche européens. Ce projet visait à développer une ligne de production complète pour les microsystèmes piézoélectriques.
  URL : http://www.sintef.no/Projectweb/piezoVolume/

OMNT, Observatoire des Micro et Nanotechnologies. Service conjoint du CEA-CNRS. **FR**

URL : http://www.omnt.fr

- Publie des revues de veille trimestrielles (dont un résumé est disponible en ligne) et synthèses annuelles sur l'actualité des micro et nanotechnologies.

GIP CNFM, Groupement d'Intérêt Public pour la Coordination Nationale de la Formation en Micro électronique et en nanotechnologies. **FR**

URL : http://www.cnfm.fr/

- Regroupement d'industries, de laboratoires de recherche et d'établissements de formation qui a entre autres pour charge de répartir les financements nationaux et d'organiser des actions communes.

Acteurs industriels

PIEZO SYSTEMS, INC. **EN**

URL : http://www.piezo.com/

- Entreprise américaine spécialisée dans la fourniture de matériaux et de dispositifs piézoélectriques. Voir la partie « Technical / FAQ's » qui propose des définitions terminologiques, un historique complet, des explications sur les transducteurs piézoélectriques, une bibliographie et un glossaire. Ressource incontournable pour aborder le domaine en anglais.

PIEZOCRYST. **EN/DE**

URL : http://www.piezocryst.com/

- Entreprise allemande spécialisée dans les capteurs piézoélectriques. Le site comporte une version allemande et une version anglaise ainsi qu'un glossaire dans ces deux langues.

INNOWATTECH, Energy harvesting systems. **EN**

URL : http://www.innowattech.co.il

- Entreprise israélienne qui propose des solutions de récupération d'énergie pour des applications sur routes, rails, pistes, trottoirs. Voir en particulier la partie « General » et la section « FAQ » sur le fonctionnement des générateurs piézoélectriques et leurs avantages par rapport à d'autres systèmes de récupération d'énergie.

(Re)Découvrir les bases de façon ludique

La récupération d'énergie par voie piézoélectrique est un domaine qui englobe plusieurs spécialités telles que l'électronique, la mécanique, l'acoustique, la science des matériaux… Il est donc nécessaire de pouvoir répondre à des questions telles que « Qu'est-ce que l'électricité ? », « Qu'est-ce que le son ? », « Comment un matériau peut-il se déformer ? », etc. Pour cela, quelques expériences ludiques sont bien plus pertinentes que des pavés truffés d'équations.

Les sorties

Il existe une carte d'abonnement annuel à la Cité des sciences et de l'industrie et au Palais de la découverte, disponible sur place aux billetteries à 25 € (tarif étudiant au 20/06/2013).

Le Palais de la découverte **FR**
Renseignements : http://www.palais-decouverte.fr

- Une mine d'informations pour tous les domaines de la physique appliquée : électricité, électromagnétisme, mécanique, science des matériaux, acoustique. Nombreuses animations, ateliers, conférences.
- ✖ Voir en ce moment l'exposition « Ruptures : les matériaux roulent des mécaniques », du 12 février au 10 novembre 2013, qui permet de comprendre les différents modes de déformation des matériaux.

La Cité des sciences et de l'industrie **FR**
Renseignements : http://www.cite-sciences.fr

- Par rapport au Palais de la découverte, la Cité des sciences et de l'industrie est plus axée sur les technologies et leurs applications : énergies renouvelables, nanotechnologies.

Les vidéos

Experiment boy. *Casser du verre avec du son ? – Fréquence de résonance.* **FR**
URL : http://www.youtube.com/watch?v=QhwuYDfATLc

- Pour répondre à la question « Qu'est-ce que le son ? » et comprendre le principe de la fréquence de résonance (utilisé pour la récupération d'énergie vibratoire).

Voir aussi du même auteur : *Fabrication et fonctionnement d'une bobine Tesla*. **FR**
URL : http://www.youtube.com/watch?v=EOn1amuckXU

- Explication du rôle d'un condensateur, fonctionnement d'un circuit LC et illustration d'une des utilisations de la fréquence de résonance en électricité.

Aborder la documentation spécialisée

Après avoir acquis une connaissance superficielle du domaine et s'être fait une idée de l'environnement dans lequel il s'inscrit (voir la partie « Premiers contacts avec le domaine »), il est temps de se frotter à des textes plus spécialisés, plus scientifiques, plus précis. Les références indiquées ci-dessous permettent une transition en douceur, exception faite des ressources portant la mention « Accessible à un public motivé » (textes un peu plus ardus, mais très structurants).

Les articles « État de l'art »

Salem SAADON, Othman SIDEK. *A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters*. Energy Conversion and Management, Volume 52, Issue 1, January 2011, Pages 500-504. **EN**

URL : http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.07.024

Excellent aperçu des différentes problématiques du domaine, avec un accent mis sur les procédés d'optimisation des récupérateurs piézoélectriques (design et mode de déformation), schémas à l'appui. Cite de nombreuses références, à exploiter pour la compilation du corpus.

Xudong WANG. *Piezoelectric nanogenerators – Harvesting ambient mechanical energy at the nanometer scale*. Nano Energy, Volume 1, Issue 1, January 2012, Pages 13-24. **EN**

URL : http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2011.09.001

Détaille les récentes avancées en matière de nano-générateurs piézoélectriques, leurs différentes applications et leur caractérisation électrique. Accessible à un public motivé.

Les thèses

Adrien BADEL (2008). *Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire.* Université de Savoie. **FR**

URL : http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/30/39/92/PDF/These_AB_C.pdf

Lire en intégralité le chapitre 1 « Généralités sur la récupération d'énergie ». Style clair et accessible.

Simon PAQUIN. *Modélisation et optimisation mécanique d'un récupérateur piézoélectrique d'énergie vibratoire*. Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, 2011. **FR**

URL : http://www.theses.ulaval.ca/2011/27833/27833.pdf

Lire notamment le chapitre 2 « Revue de la documentation scientifique et la piézoélectricité » qui pose les différentes variables d'ajustement pour l'optimisation des récupérateurs piézoélectriques. Dans ce chapitre, la sous-section « 2.4 Architecture électrique d'un récupérateur énergétique » est précieuse puisqu'elle exprime clairement la question de la partie électrique du récupérateur, question qui est souvent occultée (ou tout du moins sous-entendue) dans la littérature.

Les monographies

Michel BRISSAUD. *Matériaux piézoélectriques : caractérisation, modélisation et vibration*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007. ISBN 9782880746926. **FR**

- Un livre incontournable et très accessible

Bhag GURU and Hüseyin HIZIROGLU. *Electromagnetic Field Theory Fundamentals*. Second edition, Cambridge University Press, ISBN 9780521830164, 2004. **EN**

- Un livre écrit par des auteurs américains, avec une pédagogie à l'américaine : tout le domaine est repris depuis les bases (qu'est-ce qu'un vecteur) pour aller vers des applications pratiques. Accessible à un public motivé.

Jacques JOUHANEAU. *Notions Elémentaires d'acoustique*. 2°éd., CNAM, TEC&DOC, 2000. **FR**

- La première partie « Dynamique des vibrations, propagation et rayonnement » permet d'approfondir la compréhension de la partie électrique d'un récupérateur d'énergie. Voir notamment le Tableau des analogies page 19 qui donne les termes équivalents entre système électrique, système mécanique et système acoustique.
- Dans la seconde partie « Les microphones, les haut-parleurs et les enceintes », consulter les chapitres 5 et 6 qui expliquent la transduction piézoélectrique. Ne pas s'arrêter à l'aspect compliqué des équations qui sont souvent suivies d'explications concrètes et de définitions.

Les ressources terminologiques

Les glossaires

Il n'existe pas à ma connaissance de glossaire complet sur le domaine. Parmi les sources indiquées plus haut, j'ai indiqué les sites qui comportaient des glossaires partiels, mais ciblés. Dans cette partie, j'indique des glossaires plus conséquents de domaines connexes. Les définitions qui se trouvent demandent donc à être validées et/ou adaptées.

IEC, Commission Électronique Internationale. *Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary.* **FR/EN**
URL : http://www.electropedia.org

- Glossaire très détaillé avec des définitions en anglais et en français, comportant également les équivalents des termes en allemand, arabe, espagnol, italien, japonais, polonais, portugais, suédois.

Formules physiques. **FR**
URL : http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire

- Glossaire un peu succinct, mais dont les définitions sont extrêmement détaillées.

Formules physiques. **FR**
URL : http://www.formules-physique.com

- Ce site reprend point par point les différentes formules de la physique. Chaque formule est précédée d'une définition du phénomène puis explicitée. Voir en particulier les sections « Acoustique », « Électromagnétisme », « Résistance des matériaux ». Ressource monolingue.

Le corpus anglais

Les publications scientifiques du domaine se font majoritairement en anglais. Je conseille donc de privilégier les revues payantes accessibles gratuitement via l'ENT de l'université. Ces revues en ligne ont le bon goût de proposer différents formats de consultation pour leurs articles, ce qui permet de récupérer des ressources par copier-coller et d'éviter ainsi la fastidieuse conversion des fichiers PDF.

ELSEVIER. *Journal of Sound and Vibration (JSV).* **EN**
URL : http://www.sciencedirect.com.rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/science/journal/0022460X

- De loin la revue la plus pertinente du domaine.

Energy conversion and management. **EN**
URL : http://www.sciencedirect.com.rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/science/journal/01968904

- Revue qui adopte un point de vue moins technique pour analyser les effets des solutions proposées et dont les articles sont plus à même de fournir des contextes définitoires.

Journal of Micromechanics and Microengineering. **EN**
URL: http://iopscience.iop.org.rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/0960-1317

- Revue qui balaye tout le champ des microsystèmes électromécaniques. Elle est donc particulièrement pertinente pour l'aspect caractérisation et fabrication des MEMS.

Le corpus français

Les publications scientifiques du domaine se font majoritairement en anglais, ce qui rend plus difficile la compilation de corpus en français. Les thèses sont donc une ressource importante. Dans cette rubrique, j'ai choisi de me cantonner aux sources de documentation les plus productives. Une recherche complémentaire au cas par cas sur les sites des laboratoires de recherche et universités se révèle souvent payante.

TEL, Thèses En Ligne. **FR**

URL : http://tel.archives-ouvertes.fr/

- Serveur de thèses multidisciplinaire. Thèses de doctorat et habilitations à diriger des recherches (HDR).

Techniques de l'Ingénieur **FR**

URL : http://www.techniques-ingenieur.fr

- Dans l'onglet « Ressources documentaires », on peut accéder aux bases documentaires du site par thème. Privilégier les articles issus des domaines « Matériaux » et « Électronique – Automatique ».

GIP CNFM **FR**

URL : http://www.cnfm.fr/VersionFrancaise/cnfm/CNFM.htm

- Sur cette page, au paragraphe « Diffusion des connaissances », on trouve la documentation relative aux journées pédagogiques bisannuelles organisées par le CNFM : **papiers** et **posters pédagogiques**.

Ressources linguistiques annexes

Règles d'écriture

Imprimerie nationale. *Lexique des règles typographiques en usage à l'Imprimerie nationale.* Imprimerie nationale, 2002. **FR**
ISBN : 9782743304829

- Référence incontournable détaillant les règles de la typographie française.

Office québécois de la langue française. Banque de Dépannage Linguistique (BDL). **FR**

URL : http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bdl.html

- Outil précieux qui aborde les questions fréquentes sur la grammaire, l'orthographe, la syntaxe, le vocabulaire, etc. Ressource québecquoise, à utiliser avec discernement.

Aide à la traduction

Alexandre BUTTLER. *Comment rédiger un rapport ou une publication scientifique ?* **FR** Université de Franche-Comté, CNRS/UMR 6565. Septembre 2002.
URL : http://www.sante.univ-nantes.fr/cidmef/menu/CommentRediger.pdf

- Règles de rédaction (et donc de traduction) d'un document scientifique. Permet de comprendre les attentes du lecteur.

CRISCO. Dictionnaire Électronique des Synonymes (DES). Université de Caen. **FR**
URL : http://www.crisco.unicaen.fr/des/

- Dictionnaire électronique très ergonomique (temps de réponse rapides, navigation entre les différents termes).

ATILF, CNRS, Nancy Université. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL). **FR**

URL : http://www.cnrtl.fr/

- Ensemble de ressources linguistiques portant plutôt sur le vocabulaire général. Voir notamment l'onglet « Portail lexical » qui permet d'obtenir des informations linguistiques sur un terme (définition, étymologie, phraséologie, synonymie, extrait de concordances).

Sur la terminologie

Laurence KISTER, Evelyne JACQUEY, Bertrand GAIFFE. *Du thesaurus à l'onto-terminologie : relations sémantiques vs relations ontologiques.* CORELA, Numéro 1, Volume 9 (2011). [En ligne] Publié en ligne le 29 juin 2011. **FR**
URL : http://corela.edel.univ-poitiers.fr/index.php?id=1962

Marie-Claude L'HOMME. *La Terminologie: principes et techniques*. Montréal. Les Presses universitaires de Montréal, 2004. **FR**
ISBN : 9782760619494

Manuel de référence détaillant les règles et usages de la terminologie.